LED 光质及光周期对香梓楠幼苗生长和光合特性的影响

吴芳兰[1]，李书玲[2]，杨梅[1*]，庞伟灿[1,2]，黄靖杰[1]，李乾林[1]，樊容源[1]

（1. 广西大学 林学院 广西森林生态与保育重点实验室，南宁 530004；2. 广西壮族自治区国有七坡林场，南宁 530219）

摘　要：香梓楠（*Magnolia hypolampra*）为我国珍贵阔叶树种，在用材、香料、景观等方面具有重要价值。为了进一步培育优良苗木和开发利用其非木质资源，该研究将香梓楠幼苗放置在由2个光周期（12、16 h d^{-1}）和4种光质（R: B=8:1、R: B=6:1、R: B: P: G =8:1:1:1、R: B: P: G =6:1:1:1，其中R、B、P、G分别代表红光、蓝光、紫光、绿光）两两组合成、光照强度一致的8个光照条件下生长。结果表明：（1）香梓楠幼苗的苗高和地径增长量、叶长宽比、最大净光合速率、暗呼吸速率及光补偿点在12 h d^{-1}光周期R: B=6:1光质下最高，叶面积和叶绿素含量在16 h d^{-1}光周期R: B: P: G =6:1:1:1光质下最高；（2）16 h d^{-1}光周期处理下的苗高增长量、叶面积、质量指数、叶绿素a+b、叶绿素a/b比值、类胡萝卜素含量和光饱和点均高于12 h d^{-1}光周期的；（3）在红蓝组合光质基础上添加紫、绿光提高了幼苗的质量指数，并影响光合色素的合成和积累；（4）红蓝光比例6:1与8:1相比，更具促进香梓楠幼苗苗高、地径、叶片生长及提高光合作用的潜力。综上结果可知，对于促进香梓楠幼苗生长和进行光合作用，光周期为 16 h d^{-1}光质为R: B: P: G =6:1:1:1光照条件的潜力较大，其次为光周期为12 h d^{-1}光质为R: B=6:1的光照条件。

关键词：香梓楠，LED，光质，光周期，生长特性，光合特性

中图分类号：Q945　　　　**文献标识码：**A

Effects of LED light qualities and photoperiods on growth and photosynthetic characteristics of *Magnolia hypolampra*

WU Fanglan[1], LI Shuling[2], YANG Mei[1*], PANG Weican[1,2], HUANG Jingjie[1], LI Qianlin[1], FAN Rongyuan[1]

（1. *Guangxi Key Laboratory of Forest Ecology and Conservation*, *College of Forestry*, *Guangxi University*, Nanning 530004, China; 2. *Guangxi Zhuang Autonomous Region State-owned Qipo Forest Farm*, Nanning 530219, China）

Abstract: *Magnolia hypolampra* is a precious broad-leaved tree species in China, which is of great value in terms of wood, fragrance and landscape. In order to further cultivate excellent seedlings and develop and utilize the non-woody resources, the seedlings of *M. hypolampra* were placed under eight light conditions with the same light intensity, which were composed by two photoperiods (12, 16 h d^{-1}) and four light qualities (R: B=8:1, R: B=6:1, R: B: P: G =8:1:1:1, R: B: P: G =6:1:1:1, R, B, P and G respectively represent red light, blue light, purple light and green light). The results were as follows: (1)The growth of seedling height and ground diameter, leaf aspect ratio, maximum net photosynthetic rate, dark respiration rate and light compensation point reached the maximum values under the light quality R: B =6:1 with a photoperiod of 12 h d^{-1},

基金项目：国家重点研发计划项目（2017YFD0601101-2）；广西林业科技推广示范项目[桂林科研（2021）7 号] [Supported by the Program of National Key Research and Development (2017YFD0601101-2)]; Promotion Demonstration Program of Guangxi Forestry Science and Technology [Gui Lin Ke Yan (2021)7]。

作者简介：吴芳兰(1996 -)，硕士研究生，研究方向为森林培育，(E-mail)1274471747@qq.com。

***通信作者：**杨梅，博士，教授，研究方向为森林培育，(E-mail)fjyangmei@126.com。

while the leaf area and chlorophyll content were the highest under the light quality R: B: P: G =6:1:1:1 with a photoperiod of 16 h d^{-1}. (2) Compared to the treatment of photoperiod 12 h d^{-1}, the indicators in growth of seedling height, leaf area, quality index, chlorophyll a+b, chlorophyll a/b ratio, carotenoid content and light saturation point showed higher under photoperiod 16 h d^{-1}. (3)The addition of purple and green light into the red-blue light combination increased the quality index of seedlings and positively affected the synthesis and accumulation of photosynthetic pigments. (4) Compared with the 8:1 of red-blue light ratio, the 6:1 had more potential to promote the growth of seedling height, ground diameter and leaf and improve the photosynthesis of *M. hypolampra* seedlings. In conclusion, the light quality R: B: P: G =6:1:1:1 with a photoperiod of 16 h d^{-1} demonstrated the higher possibility to promote the growth and photosynthesis of *M. hypolampra* seedlings, followed by the light quality R: B=6:1 with a photoperiod of 12 h d^{-1}.

Key words: *Magnolia hypolampra*, LED, light quality, light photoperiod, growth characteristics, photosynthetic characteristics

相较于传统光源，LED 灯为冷光源，可靠近植物照明，具有更强的耐用性和更窄的波谱，能更好地控制光质和光强（崔瑾等，2008；Sabzalian et al., 2014）。随着生产工艺水平的提高和成本的降低，LED 灯已被广泛应用在人工补光、植物组培、遗传育种、植物工厂以及太空农业等领域，但目前在林木育苗及资源化培育中应用很少。光周期不仅能调控植物成花诱导、花芽分化和植物休眠，还影响植物的光合作用和光形态建成，调控和诱导植物生长（王建平等，2020）。在黄昏后补充 LED 照明可以显著促进植物的生长发育（Koksal et al., 2015），因此，在苗木培育中，通过补光技术，延长光周期来加快生长速度，有望解决苗木幼苗期生长缓慢的问题。光质即不同波长的光谱，是影响植物生长、叶形、花形态、生化特性和光合效率的主要因素之一(Lin et al., 2021)。光质对植物光合作用的调节主要体现在植物叶绿体形成、光合色素合成、叶片气孔运动、叶片伸展和碳同化等方面（邢阿宝等，2018）。由于植物对各种光质的敏感程度不同，在可见光光谱（400~700 nm）中，植物和光感受器所能感受到的主要波长是蓝色（400~500 nm）和红色（600~700 nm），绿色（500~600 nm）相对较少（Huché-Thélier et al., 2016））。虽然已有许多关于红蓝组合光对植物生长影响的研究，但在红蓝光基础上添加其他光源的复合光的研究还较少。

香梓楠（*Magnolia hypolampra*）又名八角香兰、香子楠、麻罕、香籽含笑等，为木兰科含笑属常绿乔木。该树种具有广泛的用途，是我国亚热带地区珍贵的用材树种和优良的园林绿化树种。前人已对其木材质量（黎小波等，2014）、轻基质育苗（麻静等，2012）和嫁接繁殖（李运兴，2001）等技术进行了研究。因其全株具有芳香气味，种子可入药兼做调味品，前人还对其叶（李国红等，2007；闫浩等，2019）、果实（刘杰凤等，2007；黄敏等，2008）、枝条（Ha et al., 2019）等部位的化学成分进行了分析，分别在种子和叶中发现在医药上具有重要用途的苯丙酸甘和小白菊内酯（Wang et al., 2011；夏伟等，2014）。可见，香梓楠还具有较大的非木质资源开发利用潜力。光照条件不仅对植物的形态建成、生理代谢、生长发育起重要调节作用，还对植物有效成分含量产生影响，所以利用光调控技术，将有助于优良香梓楠苗木培育和开发利用其非木质资源。因此，本研究利用 LED 灯调制不同光质配比和控制光周期，研究光质及光周期对香梓楠生长和光合特性的影响，筛选适合定向培育香梓楠的 LED 光环境因子组合，以期为利用 LED 光源进行木本植物资源化培育的推广应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试材料为 2 个月生的香梓楠幼苗，由广西壮族自治区国有七坡林场提供。人工光源

LED 灯管（T5 2835L）由深圳市伟信力光电有限公司生产提供。不同 LED 光源的发光峰值分别为红光 620~630 nm、蓝光 460~470 nm、紫光 410~420 nm、绿光 520~530 nm，光质配比由不同颜色灯珠的数量比构成。

1.2 试验设计

试验在广西大学林学院苗圃示范基地（108°22′ E、22°48′ N）进行。2019 年 5 月将香梓楠幼苗移植于直径 10 cm 高 15 cm 的育苗杯中，每杯中定植 1 株，置于苗圃大棚内培养。栽培基质为森林土:泥炭土:椰糠=5:3:2，基质的 pH 为 6.34，有机质含量为 25.06 g kg^{-1}，全氮为 1.98 g kg^{-1}，全磷为 0.81 g kg^{-1}，全钾为 8.54 g kg^{-1}。2019 年 6 月选取 240 株长势基本一致、无病虫害的香梓楠幼苗（苗高为 11.18±0.21 cm，地径为 3.22±0.09 mm）置于钢架培养棚中，采用 8 种不同 LED 光照环境培养。光照环境处理采用双因素交叉式分组试验设计，由 2 个光周期（12、16 h d^{-1}）和 4 种光质（R: B=8:1、R: B=6:1、R: B: P: G =8:1:1:1、R: B: P: G =6:1:1:1，其中 R、B、P、G 分别代表红光、蓝光、紫光、绿光）分别组合成 8 个处理：12×8R1B、12×6R1B、12×8R1B1P1G、12×6R1B1P1G、16×8R1B、16×6R1B、16×8R1B1P1G、16×6R1B1P1G，每个处理 3 个重复，每个重复 10 株苗木。光周期采用定时器调控，12、16 h d^{-1} 光周期的光照时间分别为 7:00—19:00、5:00—21:00。钢架培养棚高 0.9 m，宽 0.8 m，棚四周使用两层遮荫网为遮光材料，避免外界光环境的过多干扰。每个光环境培养棚顶部均安装 LED 灯 2 盏，使用 MQ-500 手持式光量子测量仪（Apogee Instruments 公司，美国）测定光照强度，并调整光源到幼苗顶部的距离为 30±5 cm，使幼苗顶部光照强度为 100±10 μmol·m^{-2} s^{-1}。棚内设自动喷灌系统，每天喷灌 2 次，棚内温度 28±3 ℃，相对湿度 50%～60%。每月定期对每株幼苗施用同种等量的复合肥。

1.3 指标测定

1.3.1 植株生长指标测定

2019 年 6 月开始光照处理时对每株幼苗苗高、地径、叶面积进行初次测定。地径采用 0.01 mm 精度电子数显游标卡尺测量；苗高为根径至生长点距离，采用 0.1 cm 精度直尺测量；采用 YM J-B 便携式叶面积仪（浙江托普云农科技股份有限公司，中国）测定从顶端往下数第三片完全展开叶的叶面积。同年 10 月进行第二次测定，并每处理选取 3 株（每个重复 1 株）生长中等水平的幼苗，将其连根从土壤中挖出，冲洗干净，并吸干水后，用电子天平分别称量根、茎和叶鲜重，烘干至恒重后称其干重，并计算相应的参数（刘金炽等，2020；付志高等，2021）：

（1）叶重比（leaf biomass ratio , LBR）=叶干重/全株干重；

（2）根重比（root biomass ratio , RBR）=根干重/全株干重；

（3）茎重比（stem biomass ratio , SBR）=茎干重/全株干重；

（4）根冠比（root/shoot ratio , R/SR）=根干重/(茎干重+叶干重)；

（5）质量指数（quality index, QI）=全株干重/(苗高/地径+茎干重/根干重)。

1.3.2 植株叶片光合特征参数测定

2019 年 10 月，选择晴朗、无强风、气温较稳定的日子，每个处理选取 3 株（每个重复 1 株）生长势一致、叶片完好的植株，于上午 9:00—12:00 采用 Li-6400 便携式光合测定仪（Li-COR 公司，美国）测定植株叶片光响应曲线。光合有效辐射梯度为 0、20、50、100、150、200、400、600、800、1 000、1 200、1 500 μmol·m^{-2} s^{-1} ，测定叶片为植株顶端往下数第三片的成熟健康叶。叶室温度控制为 30±1 ℃，相对湿度为(50±5)%，外界 CO_2 浓度为 400 μmol·m^{-2} s^{-1}，每个光合有效辐射梯度下平衡 3±0.5 min。

采用直角双曲线修正模型拟合光响应曲线（汪凤林等，2017）：

$$P_n = \alpha \frac{1-\beta I}{1+\gamma I} I - R_d$$

式中：P_n 为净光合速率；I 为光合有效辐射；α 为初始斜率；β、γ 为系数；R_d 为暗呼吸速率。

通过拟合光响应曲线得到最大净光合速率（A_{max}）、光补偿点（LCP）、光饱和点（LSP）、暗呼吸速率（R_d）等反映植物光合特性的参数。

1.3.3 植株叶片光合色素含量测定

2019 年 10 月，选用与测定光响应曲线一致的叶片测定光合色素含量。使用打孔器将叶片打成直径 1 cm 的小圆片，将同一个处理内的圆片混合后，称取 3 份平行样，参考熊庆娥(熊庆娥，2003)等的方法测定叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素含量，并计算叶绿素 a+b 和 a/b 比值。

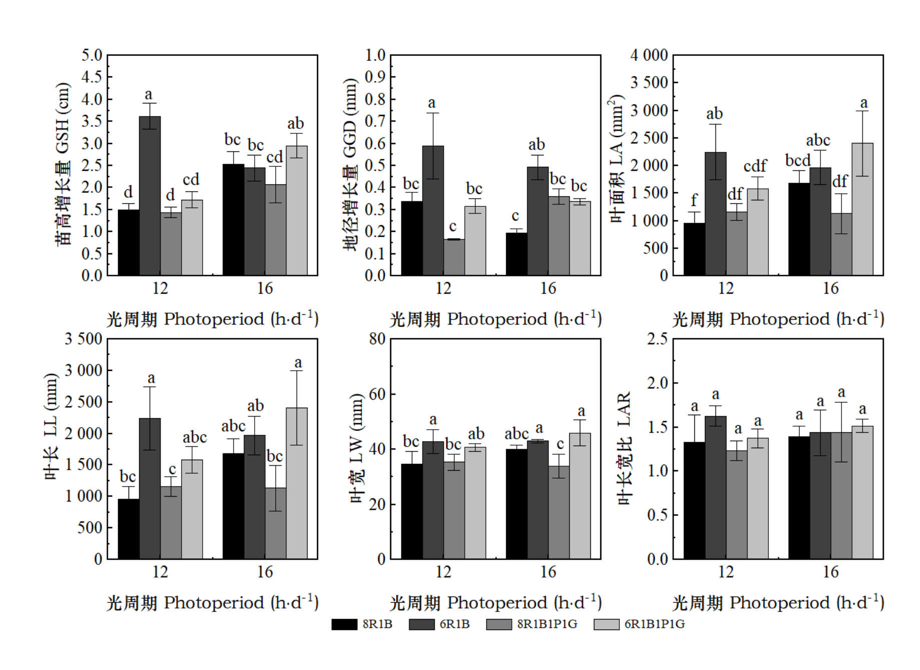
1.4 数据处理

利用 Microsoft Excel 2019 和 IBM SPSS 25.0 统计分析软件对数据进行统计分析，Duncan 检验法进行多重比较分析和差异显著性检验(α=0.05)，使用 Origin 2021 和 R 软件作图。图表中数据为平均值±标准差。

2 结果与分析

2.1 光质及光周期对香梓楠幼苗主要形态特征的影响

由图 1 可知，12×6R1B 处理的苗高、地径增长量及叶长宽比最高，分别为 3.62 cm、0.59 mm、1.63，分别是最低处理的 251.39%、353.93%、131.52%，其叶面积、叶长、叶宽仅次于 16×6R1B1P1G 处理，其中苗高、地径增长量及叶面积显著高于 12 h d^{-1} 光周期的其他处理。16×6R1B1P1G 处理的叶面积最高，为 2 403.88 mm^2，是最低处理的 251.94%，其苗高增长量仅次于 16×6R1B 处理。除 12×6R1B 处理外，16 h d^{-1} 光周期的幼苗苗高增长量及叶面积均比 12 h d^{-1} 光周期高。在 2 个光周期中，幼苗的主要形态指标大体表现为 6R1B 和 6R1B1P1G 光质高于 8R1B 和 8R1B1P1G 光质。由表 1 可知，光质、光周期及其交互作用显著影响苗高增长量和叶面积（P<0.05），光质和交互作用显著影响地径增长量、叶长及叶宽（P<0.05）。



GSH. 苗高增长量；**GGD**. 地径增长量；**LA**. 叶面积；**LL**. 叶长；**LW**. 叶宽；**LAR**. 叶长宽比。不同小写字母表示两处理间差异显著（P<0.05）。下同。

GSH. Growth of seedling height; **GGD**. Growth of ground diameter; **LA**. Leaf area; **LL**. Leaf length; **LW**. Leaf

width; **LAR**. Leaf aspect ratio. Different lowercase letters indicate significant differences between the two treatments (P<0.05). The same below.

图 1 不同光质及光周期对香梓楠幼苗生长形态的影响

Fig.1 Effects of different light qualities and photoperiods on growth morphology of *Magnolia hypolampra* seedling

表 1 不同光质及光周期下香梓楠幼苗生长形态的双因素方差分析

Table 1 Two-way ANOVA analysis on growth morphology of *Magnolia hypolampra* seedling under different light qualities and photoperiods

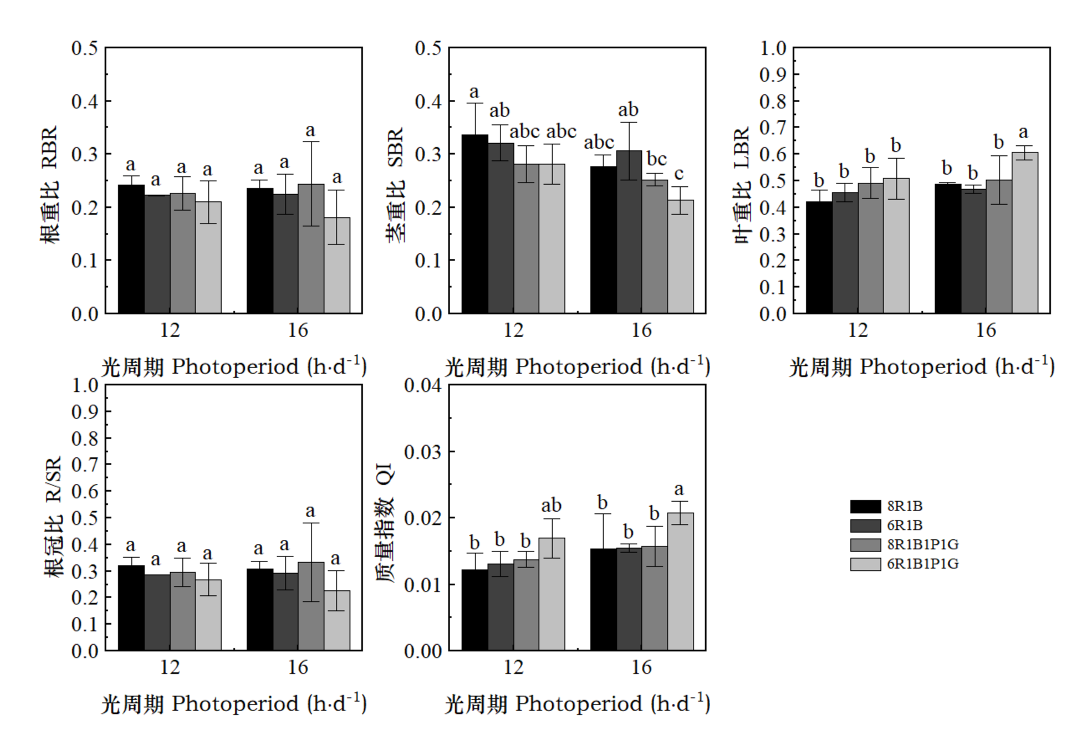
指标 Indicator	光质 Light quality		光周期 Photoperiod		光质×光周期 Light quality×Photoperiod	
	F	P	F	P	F	P
苗高增长量 GSH	8.678	0.001**	5.281	0.035*	8.570	0.001**
地径增长量 GGD	9.085	0.001**	0.023	0.881	2.947	0.064
叶面积 LA	11.136	0.000 **	4.666	0.046*	3.622	0.036*
叶长 LL	6.481	0.004**	2.078	0.169	1.729	0.201
叶宽 LW	9.145	0.001**	2.772	0.115	1.570	0.236
叶长宽比 LAR	1.115	0.372	0.465	0.505	1.075	0.387

注：**GSH**. 苗高增长量；**GGD**. 地径增长量；**LA**. 叶面积；**LL**. 叶长；**LW**. 叶宽；**LAR**. 叶长宽比。 *表示显著差异（P<0.05）；**表示极显著差异（P<0.01）。下同。

Note：**GSH**. Growth of seedling height; **GGD**. Growth of ground diameter; **LA**. Leaf area; **LL**. Leaf length; **LW**. Leaf width; **LAR**. Leaf aspect ratio. * means significant differences (P<0.05); ** means extremely significant differences (P<0.01). The same below.

2.2 光质及光周期对香梓楠幼苗生物量分配的影响

由图 2 可知，红蓝组合光基础上添加紫绿光降低幼苗茎重比，但提高叶重比与质量指数。在同一光质不同光周期环境生长的幼苗的叶重比与质量指数表现为 16 h d^{-1} 光周期高于 12 h d^{-1} 光周期。在 2 个光周期中，各光质下幼苗的质量指数从小到大排序均为 8R1B<6R1B<8R1B1P1G<6R1B1P1G，其中，除 12×6R1B1P1G 处理外，16×6R1B1P1G 处理为 0.02，显著高于其他处理，是质量指数最低的 12×8R1B 处理的 170.56%。由表 2 可知，光质和光周期显著影响茎重比、叶重比和质量指数（P<0.05），但其交互作用对茎重比、叶重比和质量指数未产生明显的影响。



RBR. 根重比；**SBR**. 茎重比；**LBR**. 叶重比；**R/SR**. 根冠比；**QI**. 质量指数。

RBR. Root biomass ratio; **SBR**. Stem biomass ratio; **LBR**. Leaf biomass ratio; **R/SR**. Root / shoot ratio; **QI**. Quality index.

图 2 不同光质及光周期对香梓楠幼苗生物量分配及质量指数的影响

Fig.2 Effects of different light qualities and photoperiods on biomass allocation and quality index of *Magnolia hypolampra* seedling

表 2 不同光质及光周期下香梓楠幼苗生物量分配和质量指数的双因素方差分析

Table 2 Two-way ANOVA analysis on the biomass allocation and quality index of *Magnolia hypolampra* seedling under different light qualities and photoperiods

指标 Indicator	光质 Light quality		光周期 Photoperiod		光质×光周期 Light quality×Photoperiod	
	F	*P*	*F*	*P*	*F*	*P*
根重比 RBR	1.356	0.292	0.055	0.818	0.329	0.804
茎重比 SBR	4.143	0.024*	7.578	0.014*	0.632	0.605
叶重比 LBR	4.809	0.014*	4.903	0.042*	0.964	0.434
根冠比 R/SR	1.206	0.34	0.005	0.947	0.341	0.796
质量指数 QI	4.337	0.02*	6.485	0.022*	0.126	0.943

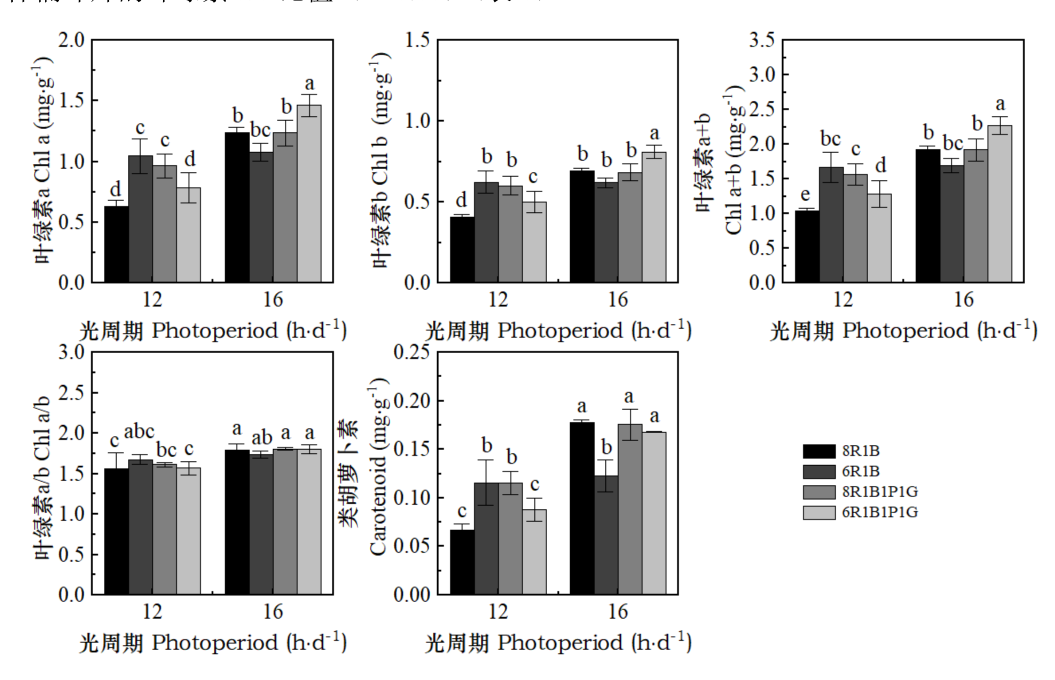
注：**RBR**. 根重比；**SBR**. 茎重比；**LBR**. 叶重比；**R/SR**. 根冠比；**QI**. 质量指数。

Note: **RBR**. Root biomass ratio; **SBR**. Stem biomass ratio; **LBR**. Leaf biomass ratio; **R/SR**. Root / shoot ratio; **QI**. Quality index.

2.3 光质及光周期对香梓楠幼苗叶片光合色素的影响

由图 3 可知，12×8R1B 处理的光合色素含量均显著低于其他处理，16×6R1B1P1G 处理的叶绿素 a、b 及叶绿素 a+b 含量分别为 1.46、0.81、2.27 mg g^{-1}，显著高于其他处理，分别是最低的 12×8R1B 处理的 232.00%、199.43%、219.24%。16 h d^{-1} 光周期的幼苗叶片光合色素含量及叶绿素 a/b 比值均高于 12 h d^{-1} 光周期的。光质、光周期及其交互作用显著影响香

梓楠叶片的叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素 a+b 及类胡萝卜素含量（$P<0.05$），光周期显著影响香梓楠叶片的叶绿素 a/b 比值（$P<0.05$）（表 3）。



Chl a. 叶绿素 a；**Chl b**. 叶绿素 b；**Chl a+b**. 叶绿素 a+b；**Chl a/b**. 叶绿素 a/b 比值。

Chl a. Chlorophyll a; **Chl b**. Chlorophyll b; **Chl a+b**. Chlorophyll a+b; **Chl a/b**. Chlorophyll a/b ratio.

图 3 不同光质及光周期对香梓楠幼苗叶片光合色素含量的影响

Fig.3 Effects of different light qualities and photoperiods on photosynthetic pigment contents in leaves of *Magnolia hypolampra* seedling

表 3 不同光质及光周期下香梓楠幼苗光合色素含量的双因素方差分析

Table 3 Two-way ANOVA analysis on photosynthetic pigment contents of *Magnolia hypolampra* seedling under different light qualities and photoperiods

指标 Indicator	光质 Light quality		光周期 Photoperiod		光质×光周期 Light quality×Photoperiod	
	F	*P*	*F*	*P*	*F*	*P*
叶绿素 a Chl a	4.521	0.018*	99.210	0.000**	14.429	0.000**
叶绿素 b Chl b	5.955	0.006**	74.185	0.000**	15.347	0.000**
叶绿素 a+b Chl a+b	5.207	0.011*	94.879	0.000**	15.399	0.000**
叶绿素 a/b Chl a/b	0.185	0.905	27.461	0.000**	1.414	0.275
类胡萝卜素 Carotenoid	4.790	0.014*	143.678	0.000**	16.389	0.000**

注：**Chl a**. 叶绿素 a；**Chl b**. 叶绿素 b；**Chl a+b**. 叶绿素 a+b；**Chl a/b**. 叶绿素 a/b 比值。

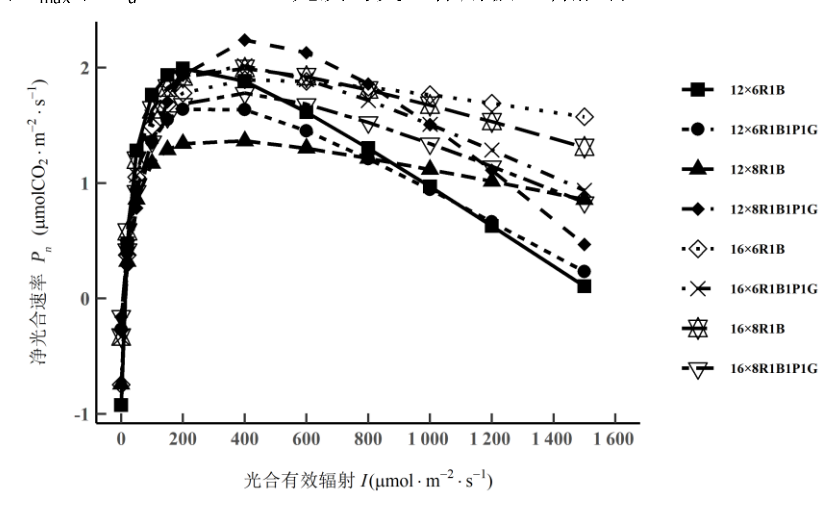
Note: **Chl a**. Chlorophyll a; **Chl b**. Chlorophyll b; **Chl a+b**. Chlorophyll a+b; **Chl a/b**. Chlorophyll a/b ratio.

2.4 光质及光周期对香梓楠幼苗叶片光合特性的影响

图 4 为拟合后的光响应曲线。由图 4 可知，在光合有效辐射低于 200 μmol·m^{-2} s^{-1} 时，各光照处理下香梓楠叶片 P_n 均随着光合有效辐射的增加而快速升高，当光合有效辐射高于 200 μmol·m^{-2} s^{-1} 时，P_n 随光合有效辐射增加的变化逐渐变缓，各处理的 P_n 值差异逐渐变大。

由表 4 可知，香梓楠叶片的 A_{max} 在 12×6R1B 处理下最高（3.38 μmolCO_2·m^{-2} s^{-1}），并显著高于其他处理，其次为 16×6R1B1P1G 处理（2.57 μmolCO_2·m^{-2} s^{-1}），最低为 16×8R1B1P1G 处理（1.97 μmolCO_2·m^{-2} s^{-1}））。12×6R1B 和 12×8R1B 处理的 R_d 显著高于其他处理，

16×8R1B1P1G 处理的 R_d 最低。12×8R1B1P1G 处理的 LSP 为 677.13 μmol·m^{-2} s^{-1}，显著高于其他处理，且除 12×8R1B1P1G 处理外，16 h d^{-1} 光周期其他处理的 LSP 均高于 12 h d^{-1} 光周期的。12×6R1B 和 12×8R1B 处理的 LCP 较高，而 LSP 较低。光质、光周期及其交互作用极显著影响 A_{max} 和 R_d（P<0.01），光质与交互作用极显著影响 LSP（P<0.01）（表 5）。



P*$_n$**. 净光合速率；I***. 光合有效辐射。

P*$_n$**. Net photosynthetic rate; ***I. Photosynthetically active radiation.

图 4 不同光质及光周期对幼苗叶片净光合速率的影响

Fig.4 Effects of different light qualities and photoperiods on P_n in leaves of *Magnolia hypolampra* seedling

表 4 不同光质及光周期对香梓楠幼苗叶片光合特征参数的影响

Table 4 Effects of different light qualities and photoperiods on photosynthetic characteristic parameters in leaves of *Magnolia hypolampra* seedling

光周期 Photoperiod (h d^{-1})	光质 Light quality	最大净光合速率 A_{max}（μmolCO$_2$ m^{-2} s^{-1}）	暗呼吸速率 R_d（μmolCO$_2$ m^{-2} s^{-1}）	光饱和点 LSP（μmol·m^{-2} s^{-1}）	光补偿点 LCP（μmol·m^{-2} s^{-1}）
12	8R1B	2.46±0.15b	1.1±0.12a	314.39±92.28cd	11.66±5.16a
	6R1B	3.38±0.08a	1.32±0.23a	257.68±48.51d	12.38±4.54a
	8R1B1P1G	2.56±0.12b	0.14±0.02cd	677.13±128.76a	7.89±1.49ab
	6R1B1P1G	2.05±0.08c	0.42±0.11bc	324.08±20.61cd	8.13±0.61ab
16	8R1B	2.38±0.1b	0.39±0.17bc	411.01±35.58bcd	5.73±1.61b
	6R1B	2.52±0.17b	0.64±0.23b	563.17±192.17ab	8.75±0.38ab
	8R1B1P1G	1.97±0.21c	0.08±0.00d	444.54±23.27bc	8.25±1.09ab
	6R1B1P1G	2.57±0.22b	0.55±0.22b	388.99±28.81cd	10.93±3.28ab

注：***A*$_{max}$**. 最大净光合速率；***R*$_d$**. 暗呼吸速率；**LSP**. 光饱和点；**LCP**. 光补偿点。不同小写字母表示两处理间差异显著（P<0.05）。

Note: ***A*$_{max}$**. Maximum net photosynthetic rate; ***R*$_d$**. Dark respiration rate; **LSP**. Light saturation point; **LCP**. Light compensation point. Different lowercase letters indicate significant differences between the two treatments (P<0.05).

表 5 不同光质及光周期下香梓楠幼苗光合特征参数的双因素方差分析

Table 5 Two-way ANOVA analysis on the photosynthetic characteristic parameters of *Magnolia hypolampra* seedling under different light qualities and photoperiods

指标 Indicator	光质 Light quality		光周期 Photoperiod		光质×光周期 Light quality×Photoperiod	
	F	P	F	P	F	P
最大净光合速率 A_{max}	25.985	0.000**	16.741	0.001**	24.239	0.000**
暗呼吸速率 R_d	31.401	0.000**	24.2	0.000**	10.317	0.001**
光饱和点 LSP	6.455	0.005**	2.445	0.137	8.732	0.001**
光补偿点 LCP	0.866	0.479	1.902	0.187	2.856	0.070

3 讨论

3.1 幼苗生长对光质及光周期的响应

红光可促进植物茎伸长和干物质积累，蓝光对植物的伸长生长具有抑制作用（Li et al., 2016；Hosseini et al., 2019），较红蓝单色光红蓝组合光更有利于植物的生长（Sang-Ho et al., 2007；Li & Kubota, 2009）。本研究中，较8R1B、8R1B1P1G光质，6R1B、6R1B1P1G光质提高了香梓楠幼苗的苗高、地径增长量、叶面积及叶长宽比，这可能是某一单色光比例的改变引起了避荫效应（Keuskamp et al., 2012），进而影响香梓楠幼苗的生长形态。3R1B是促进番茄幼苗植株生长最佳的红蓝组合光（王丽伟等，2017），7R3B是促进红叶石楠组培苗生长最佳的红蓝组合光（王政等，2019），1R9B是培育油茶壮苗较为理想的红蓝组合光质（龚洪恩等，2018），可见，植株对光质的响应具物种特性（胡举伟等，2019）。在红蓝组合光基础上添加绿光对黄瓜幼苗植株形态没有影响（Hernández & Kubota, 2016），本研究添加紫、绿光对香梓楠生长形态的促进效果也不明显。而另有研究发现红色和蓝色光中加入24%的绿光可以促进植株生长（Kim et al., 2004），高强度绿色LED光对植物生长有促进作用（Johkan et al., 2012）。因此，添加具有足够高的光照强度和比例的绿光，可能才会对香梓楠幼苗的生长形态产生影响。延长光周期提高了香梓楠幼苗苗高增长量与叶面积，这与不同光照时间对欧美杨幼苗生长的研究结果相似（刘成功等，2018）。

苗木各部分的协调和平衡共同决定了苗木质量的高低，苗木质量指数越高，苗木质量越好（周磊等，2021）。延长光周期使香梓楠叶片进行光合作用时长增加，光合产物分配向叶片倾斜，使分配到茎的光合产物减少，导致茎重比降低，叶重比增加，从而提高香梓楠幼苗的质量指数。在红蓝组合光基础上添加紫绿光，香梓楠幼苗在形态建成上没有表现出规律性，但在生物量分配上表现出一定的规律性，具体表现为添加紫绿光后降低了茎重比，提高了叶重比，并且最终提高了质量指数，这体现了复合光对植物的作用效应不是单色光作用简单累加，而是一个复杂的响应过程，与刘晓英等（2010）研究结果相似。而在16 h d^{-1}光周期中，8R1B、6R1B与8R1B1P1G光质间的质量指数相差不大，原因可能是较光质对香梓楠幼苗生长发育的影响，延长光周期对幼苗的生长影响更大（曹宝慧等，2020）。

3.2 幼苗光合生理对光质及光周期的响应

光影响光合色素的形成，光合色素能够吸收、传递和转换光能，其含量与组成直接影响叶片的光合速率，从而影响植株的生长（Gao et al., 2020）。前人研究发现在红蓝复合光基础上添加紫光及紫黄光显著地降低叶片的叶绿素含量，添加黄光、绿光及绿黄紫光显著增大了叶绿素和类胡萝卜素的值，红蓝黄绿紫复合光有利于光合色素积累（刘晓英等，2010；郭丽丽等，2015）。本研究在红蓝光质基础上添加少量绿光与紫光后，显著提高了12×8R1B1P1G和16×6R1B1P1G处理的叶绿素和类胡萝卜素含量，降低了12×6R1B1P1G处理的叶绿素和类胡萝卜素含量，这可能是红蓝组合光基础上添加其他光质导致了互补效应的产生，进而导致植物光合色素的合成与积累的不同。较12 h d^{-1}光周期，16 h d^{-1}光周期处理促进香梓楠叶片叶绿素和类胡萝卜素含量和叶绿素a/b比值增加，能更有效地促进叶片对光能的转换、捕获和传递能力，Xu et al.（2020）在杉木组培苗中也得出相似的研究结果。

光合速率是衡量光合作用的量的指标（潘瑞炽，2004），A_{max} 反映了叶片的光合潜能。在红蓝 LED 混合光处理下，由于红蓝光谱能量分布与叶绿素吸收的相似性，植物通过增加净光合速率来生长发育（Kim et al., 2004）。在 8 种光照条件下，12×6R1B 和 16×6R1B1P1G 处理都具有较高的 A_{max}，其苗高、地径增长量及叶面积也表现为较高水平，由此可见，适合的光周期与光质组合能显著提高植物的光合与生长能力。LSP 和 LCP 分别反映了植物对强光和弱光的利用能力和生态的适应性（康红梅等，2021），光谱越窄植物适应光照范围越小，对弱光和强光的利用和对生态的适应性也越弱。在 12 h d^{-1} 光周期中，6R1B 和 8R1B 光质处理有较低的 LSP，较高的 LCP 和 R_d，生产能力低而消耗高，对环境的适应性较弱；6R1B1P1G 和 6R1B1P1G 光质处理有较高的 LSP，较低的 LCP 和 R_d，生产能力高而消耗低，对环境的适应性较强；而在 16 h d^{-1} 光周期中却几乎表现出相反的结果，其原因也可能是较改变光质比例，延长光周期对香梓楠幼苗光合生理的影响更大。

4 结论

光质和光周期及其相互作用不仅对香梓楠幼苗的生长和形态产生了影响，还显著影响了相关光合过程。较红蓝光比例为8:1的光质，红蓝光比例为6:1的光质促进香梓楠幼苗苗高、地径、叶片生长及提高光合作用的潜力更大。在红蓝组合光质的基础上添加紫、绿光质提高了幼苗的质量，并且对光合色素的合成和积累产生影响。光周期16 h d^{-1}较12 h d^{-1}更能促进香梓楠幼苗叶片光合色素的合成和积累，进而促进光合作用的进行和植株的生长。8个光照条件中，16×6R1B1P1G光照条件对促进香梓楠幼苗生长和进行光合作用具有较大的潜力，其次为12×6R1B。

参考文献：

CUI J, XU ZG, DI XR, 2008. Applications and prospects of light emitting diode in plant protected culture[J]. Trans Chin Soc Agric Eng, 24(8): 249-253. [崔瑾，徐志刚，邸秀茹，2008. LED在植物设施栽培中的应用和前景[J]. 农业工程学报，24(8)：249-253.]

CAO BH, LIU P, WEI HX, et al., 2020. Effects of different exogenous light sources on the growth, nutrient accumulation and non-structural carbohydrate of *Acer truncatum* seedlings[J]. J Shenyang Agric Univ, 51(6): 656-662. [曹宝慧，刘平，魏红旭，等，2020. 不同外源光对元宝枫幼苗生长、养分积累和非结构性碳水化合物的影响[J]. 沈阳农业大学学报，51(6)：656-662.]

FU ZG, LI LF, WANG K, et al., 2021. Effects of slow-release fertilizer matching N and P fertilizer on growth and biomass for wild transplanted seedlings of *Keteleeria evelyniana*[J]. J Sichuan Agric Univ, 39(2): 212-219. [付志高，李莲芳，王凯，等，2021. 缓释肥及氮和磷肥配施对滇油杉野生移栽苗木生长和生物量的影响[J]. 四川农业大学学报，39(2)：212-219.]

GONG HE, DING YF, YAO XH, et al., 2018. Effects of light qualities on growth and photosynthetic characteristics of *Camellia oleifera* cutting stocks[J]. For Res, 31(2): 176-182. [龚洪恩，丁怡飞，姚小华，等，2018. LED光质对油茶苗生长和光合特性的影响[J].林业科学研究，31(2)：176-182.]

GAO S, LIU XN, LIU Y, et al., 2020. Photosynthetic characteristics and chloroplast ultrastructure of welsh onion (*Allium fistulosum* L.) grown under different LED wavelengths[J]. BMC Plant Biol, 20(1): 78.

GUO LL, LIU GX, GUO Q, et al., 2015. Effects of LED polychromatic light on morphological and physiological characteristics of 'Luoyang Hong'[J]. J Nucl Agric Sci, 29(5): 995-1000. [郭

丽丽，刘改秀，郭琪，等，2015. LED复合光质对洛阳红形态和生理特性的影响[J]. 核农学报，29(5)：995-1000.]

HUCHÉ-THÉLIER L, CRESPEL L, GOURRIEREC JL, et al., 2016. Light signaling and plant responses to blue and UV radiations-Perspectives for applications in horticulture[J]. Environ Exp Bot, 121: 22-38.

HUANG M, LIU JF, PENG X, et al., 2008. Extraction of volatile oil in *Michelia Hedyosperma* Lew and determination of its chemical components[J]. Phys Test Chem Anal, Part B: Chem Anal, 44(4): 330-331. [黄敏，刘杰凤，彭霞，等，2008. 八角香兰挥发油的提取与化学成分的测定[J]. 理化检验(化学分册)，44（4）：330-331.]

HA CTT, THAI TH, HIEN NT, et al., 2019. Chemical composition and antimicrobial activity of the leaf and twig essential oils of *Magnolia hypolampra* growing in Na Hang Nature Reserve, Tuyen Quang Province of Vietnam[J]. Nat Prod Commun, 14(6): 1934578-1986037.

HOSSEINI A, ZARE MM, ALINIAEIFARD S, et al., 2019. Photosynthetic and growth responses of green and purple basil plants under different spectral compositions[J]. Physiol Mol Biol Plant, 25(3): 741-752.

HU JW, DAI X, SONG T, et al., 2019. Effects of different light qualities on growth and photosynthetic characteristics of mulberry seedlings[J]. Bull Bot Res, 39(4): 481-489. [胡举伟，代欣，宋涛，等，2019. 不同光质对桑树幼苗生长和光合特性的影响[J]. 植物研究，39(4)：481-489.]

HERNÁNDEZ R, KUBOTA C, 2016. Physiological responses of cucumber seedlings under different blue and red photon flux ratios using LEDs[J]. Environ Exp Bot, 121: 66-74.

JOHKAN M, SHOJI K, GOTO F, et al., 2012. Effect of green light wavelength and intensity on photomorphogenesis and photosynthesis in *Lactuca sativa*[J]. Environ Exp Bot, 75: 128-133.

KOKSAL N, INCESU M, TEKE A, 2015. Supplemental LED lighting increases pansy growth[J]. Hortic Bras, 33(4): 428-433.

KEUSKAMP DH, KELLER MM, BALLARÉ CL, et al., 2012. Blue light regulated shade avoidance[J]. Plant Signaling Behav, 7(4): 514-517.

KIM HH, GOINS GD, WHEELER RM, et al., 2004. Green-light supplementation for enhanced lettuce growth under red- and blue-light-emitting diodes[J]. Hortscience A Pub Am Soc Horticul Sci, 39(7): 1617-1622.

KANG HM, SONG ZQ, CAO DM, et al., 2021. Effects of shading on photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence parameters of two shrubs[J]. North Hortic, (6): 59-65. [康红梅，宋卓琴，曹冬梅，等，2021. 遮荫对两种灌木光合特性及叶绿素荧光参数的影响[J]. 北方园艺，（6）：59-65.]

LIN KH, HUANG MY, HSU MH, 2021. Morphological and physiological response in green and purple basil plants (*Ocimum basilicum*) under different proportions of red, green, and blue LED lightings[J]. Sci Horticul, 275: 109677.

LI XB, ZHANG YW, FU YL, 2014. Bark percentage, green wood moisture content and wood density of *Micelia Hedyosperma* Law[J]. Shaanxi For Sci Technol, (4): 1-4. [黎小波，张钰雯，符韵林，2014. 香梓楠树皮率、生材含水率及木材密度研究[J]. 陕西林业科技，（4）：1-4.]

LI YX, 2001. Grafting propagation experiment of *Micelia hedyosperma* Law[J]. Guangxi For Sci, 30(4): 198-200. [李运兴，2001.香梓楠嫁接繁殖试验[J].广西林业科学，30(4)：198-200.]

LI GH, HONG LJ, LI KQ, et al., 2007. Nematicidal active component from *Michelia*

hedyosperma[J]. Chin J Biol Control, 23(3): 260-263. [李国红，洪林军，李可琴，等，2007. 香子含笑中的杀线虫活性成分及其毒力测定[J]. 中国生物防治，23（3）：260-263.]

LIU JF, HUANG M, TAN LQ, et al., 2007. GC/MS analysis of chemical constituents of volatile oil of *Michelia hedyosperma* Lew fruits[J]. Chin J Pharm Anal, 27(9): 1481-1483. [刘杰凤，黄敏，谭丽泉，等，2007. 八角香兰果实挥发性成分的气相色谱/质谱分析[J]. 药物分析杂志，27（9）：1481-1483.]

LIU JC, ZHAO LJ, ZHU LQ, 2020. Effects of shading on growth and photosynthetic characteristics of three Magnoliaceae seedlings[J]. Guihaia, 40(8): 1159-1168. [刘金炽，招礼军，朱栗琼，2020. 遮阴对三种木兰科幼苗生长和光合特性的影响[J]. 广西植物，40(8)：1159-1168.]

LI X, LU W, HU GY, et al., 2016. Effects of light-emitting diode supplementary lighting on the winter growth of greenhouse plants in the Yangtze River Delta of China[J]. Bot Stud, 57(1): 1-8.

LI Q, KUBOTA C, 2009. Effects of supplemental light quality on growth and phytochemicals of baby leaf lettuce[J]. Environ Exp Bot, 67: 59-64.

LIU CG, WANG MY, LIU N, et al., 2018. Effects of different irradiation duration on growth and photosynthetic characteristics of *Populus* × *euramericana* Seedlings[J]. Sci Silv Sin, 54(12): 33-41. [刘成功，王明援，刘宁，等，2018. 不同光照时间对欧美杨幼苗生长和光合特性的影响[J]. 林业科学，54(12)：33-41.]

LIU XY, XU ZG, CHANG TT, et al., 2010. Growth and photosynthesis of cherry tomato seedling exposed to different low light of led light quality[J]. Acta Bot Boreal-Occident Sin, 30(4): 725-732. [刘晓英，徐志刚，常涛涛，等，2010.不同光质LED弱光对樱桃番茄植株形态和光合性能的影响[J].西北植物学报，30（4）：725-732.]

MA J, HUANG JS, ZHANG WX, 2012. Seedling culture of *Michelia hedyosperma* with light substrate[J]. For Eng, 28(6): 25-27. [麻静，黄积寿，张万幸，2012. 香梓楠轻基质育苗试验[J]. 森林工程，28(6)：25-27.]

PAN RC, 2004. Plant physiology[M]. Beijing: Higher Education Press: 110-111. [潘瑞炽，2004. 植物生理学[M]. 北京：高等教育出版社：110-111.]

SABZALIAN MR, HEYDARIZADEH P, ZAHEDI M, et al., 2014. High performance of vegetables, flowers, and medicinal plants in a red-blue LED incubator for indoor plant production[J]. Agron Sustain Dev, 34(4): 879-886.

SANG-HO L, RAJESH K T, EUN-JOO H, et al., 2007. Photon flux density and light quality induce changes in growth, stomatal development, photosynthesis and transpiration of *Withania somnifera* (L.) Dunal. plantlets[J]. Plant Cell, Tissue Organ Cult, 90(2): 141-151.

WANG JP, WANG JZ, ZHOU J, et al., 2020. Recent progress of artificial lighting technique and effect of light on plant growth[J]. J Nanjing For Univ(Nat Sci Ed), 44(1): 215-222. [王建平，王纪章，周静，等，2020. 光照对农林植物生长影响及人工补光技术研究进展[J]. 南京林业大学学报（自然科学版），44(1)：215-222.]

WANG XY, XU M, YANG CR, et al., 2011. Phenylpropanoid glycosides from the seeds of *Michelia hedyosperma*[J]. Food Chem, 126(3): 1039-1043.

WANG FL, LIN SZ, YE YQ, et al., 2017. Comparison of light response curve fitting model and photosynthetic characteristics about Chinese fir seedlings under different light qualities[J]. Subtrop Agric Res, 13(3): 165-170. [汪凤林，林思祖，叶义全，等，2017. 杉木幼苗不同光质光响应曲线的模型拟合及光合特性比较[J]. 亚热带农业研究，13(3)：165-170.]

WANG LW, LI Y, XIN GF, et al., 2017. Effects of different proportions of red and blue light on the growth and photosynthesis of tomato seedlings[J]. Chin J Appl Ecol, 28(5): 1595-1602. [王丽伟，李岩，辛国凤，等，2017. 不同比例红蓝光对番茄幼苗生长和光合作用的影响[J]. 应用生态学报，28(5)：1595-1602.]

WANG Z, MA J, HE SL, et al., 2019. Effect of different proportion of light quality of LED light source on the growth of *Photinia* × *fraseri* tissue culture seedlings[J]. Jiangsu Agric Sci, 47(7): 152-155. [王政，马杰，何松林，等，2019. LED光源不同比例光质对红叶石楠组培苗生长的影响[J]. 江苏农业科学，47(7)：152-155.]

XING AB, CUI HF, YU XP, et al., 2018. Effects of different lights qualities and photoperiods on plant growth and development[J]. North Hortic, 3: 163-172. [邢阿宝，崔海峰，俞晓平，等，2018. 光质及光周期对植物生长发育的影响[J]. 北方园艺，3：163-172.]

XIA W, YAN H, DU JF, 2014. Studies on the extraction of parthenolide from the leaves of two species of *Michelia* in Hainan[J]. Technol Innovation Appl, 14: 37. [夏伟，闫浩，杜金凤，2014. 海南两种含笑属植物叶中提取小白菊内酯的研究[J]. 科技创新与应用，14：37.]

XIONG QE, 2003. Experimental course in plant physiology[M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press: 30-40. [熊庆娥，2003. 植物生理学实验教程[M]. 成都：四川科学技术出版社：30-40.]

XU YY, YANG M, CHENG F, et al., 2020. Effects of LED photoperiods and light qualities on *in vitro* growth and chlorophyll fluorescence of *Cunninghamia lanceolata*[J]. BMC Plant Biol, 20(1): 269.

YAN H, XU XF, DU JF, 2019. GC-MS analysis and antimicrobial study of volatile oil from *Michelia hedyosperma* leaves[J]. J Agric, 9(3): 56-60. [闫浩，徐雪峰，杜金风，2019. 香子含笑叶挥发油GC-MS分析及抗菌性研究[J]. 农学学报，9(3)：56-60.]

ZHOU L, LIU ML, LI TH, et al., 2021. Effects of fertilization on growth and photosynthetic of *Phoebe hui* seedlings [J]. J Cent South Univ For Technol, 41(7): 80-87. [周磊，刘美玲，李铁华，等，2021. 施肥对细叶桢楠容器苗生长与光合的影响[J]. 中南林业科技大学学报，41(7)：80-87.]